

SOURCE DE PHOTONS COMPRENANT
UNE SOURCE RCE A GRADIENT DE PRESSION

Domaine technique et art antérieur

La présente invention concerne une source de photons et, plus particulièrement, une source de photons comprenant une source de plasma d'ions multichargés à la résonance cyclotron électronique (RCE) plus communément appelée source RCE.

Une application de la source de photons selon l'invention est, par exemple, la production de photons EUV (EUV pour « Extrême Ultra-Violet ») pouvant être utilisée pour la lithographie.

Différentes sources de lumière sont utilisées pour la lithographie EUV, telles que, par exemple, les plasmas laser (LPP), la lumière synchrotron, les sources à décharges (Z-pinch, cathode creuse, source capillaire). Ces sources EUV présentent, selon les cas, les problèmes suivants :

- fonctionnement pulsé et puissance trop faible pour certains lasers ;
- 20 - production de débris néfastes aux optiques (miroirs) ;
- coût élevé (lasers, synchrotron) ;
- pompage important ;
- reproductibilité et durée de vie de la source 25 médiocres.

Les plasmas radiofréquence, plus communément appelés plasma RF, sont peu utilisés pour réaliser des sources de photons EUV, car la densité électronique y est assez faible. Pour pallier cet inconvénient, la 5 demande de brevet américain US-2003-0006708 (cf. référence [1]) propose une source de photons qui combine un plasma RF et un plasma RCE. Il est considéré, dans cette demande de brevet, que la 10 structure magnétique qui conduit à la résonance cyclotron électronique est compliquée à réaliser. Une solution dépourvue d'une telle structure est alors proposée. La source de photons obtenue comprend peu 15 d'états de charge (cf. figure 1) et un seul élément émet des photons de longueur d'onde voulue. Un inconvénient de cette source de photons est la faible 20 puissance qu'elle délivre qui est de l'ordre du milliwatt.

Plus récemment, une source de photons EUV qui utilise la désexcitation d'ions multichargés produits 25 par une source RCE a été proposée (cf. référence [2]). La source de photons divulguée produit des photons de longueur d'onde 13,5nm à partir de la désexcitation d'ions Xe^{10+} . Du fait de leur faible longueur d'onde, les photons émis permettent avantageusement de réaliser 30 des gravures inférieures à 65nm. Un inconvénient de cette source de photons est cependant la faible puissance émise, à savoir 100 wW dans 2π stéradians.

Par rapport aux sources de lumière mentionnées ci-dessus, une source de photons qui utilise une source 35 RCE présente toutefois de nombreux avantages :

- fonctionnement continu et stable ;

- pas de débris en sortie ;
- pas d'usure (temps d'utilisation très long dû à l'absence de filament ou de cathode) ;
- faible pression (10^{-5} - 10^{-4} mbar) permettant de 5 limiter les dimensions des pompes et les vibrations éventuelles ;
- faible coût, si la structure magnétique est réalisée en aimants permanents.

10 Comme cela a déjà été mentionné ci-dessus, un problème majeur d'une source de photons qui produit des photons à partir d'une source RCE est cependant la faible puissance qu'elle émet. L'invention ne présente pas cet inconvénient.

Exposé de l'invention

15 En effet, l'invention concerne une source de photons comprenant une source de plasma d'ions multichargés à la résonance cyclotron électronique (RCE), les ions multichargés correspondant à plusieurs états de charge d'un premier constituant introduit dans 20 une chambre sous vide, au moins un état de charge émettant, par désexcitation, des photons de longueur d'onde λ_0 . La source de photons comprend, en outre, des moyens pour établir, à l'intérieur de la chambre, un gradient de pression du premier constituant et/ou d'au 25 moins un deuxième constituant différent du premier constituant, le gradient de pression étant apte à créer un gradient en énergie d'électrons du plasma tel que des ions multichargés supplémentaires correspondant à au moins un état de charge du premier constituant et/ou 30 au moins un état de charge du deuxième constituant sont

créés dans la chambre, les ions multichargés supplémentaires émettant, par désexcitation, des photons de longueur d'onde sensiblement égale à λ_0 .

Selon une autre caractéristique de l'invention,
5 les moyens pour établir un gradient de pression comprennent un premier diaphragme situé sur un premier côté de la chambre et un deuxième diaphragme situé sur un deuxième côté de la chambre, opposé au premier côté, où est située une ouverture par laquelle les photons
10 sont extraits de la source de photons.

Selon une autre caractéristique de l'invention,
le deuxième diaphragme comprend un orifice central par lequel les photons sont extraits de la source de photons et des trous de pompage distribués autour de
15 l'orifice central, le diamètre des trous de pompage étant choisi pour empêcher que des micro-ondes qui sont injectées dans la chambre cylindrique sous vide ne sortent de la chambre, le nombre de trous de pompage étant choisi, en relation avec le diamètre des trous,
20 pour établir une valeur de pression du premier constituant et/ou du deuxième constituant dans une zone de la chambre située à proximité du deuxième diaphragme.

Selon une autre caractéristique de l'invention,
25 le deuxième diaphragme est fait d'un matériau conducteur et il est polarisé soit pour capturer des ions sur des zones d'impact et pour renvoyer des électrons vers le plasma, soit pour capturer des électrons sur des zones d'impact et pour renvoyer des
30 ions vers le plasma.

Selon une autre caractéristique de l'invention, la source de photons comprend Q diaphragmes supplémentaires placés entre les premier et deuxième 5 diaphragmes de sorte que la chambre est divisée en $Q+1$ zones.

Selon une autre caractéristique de l'invention, chacun des Q diaphragmes supplémentaires comprend une ouverture de taille supérieure à une longueur d'onde de 10 coupure de micro-ondes injectées dans la chambre.

Selon une autre caractéristique de l'invention, l'ouverture de chacun des Q diaphragmes supplémentaires a une forme telle qu'elle n'intercepte pas les lignes d'un champ magnétique présent dans la chambre, laissant 15 ainsi des particules du plasma circuler librement entre les $Q+1$ zones.

Selon une autre caractéristique de l'invention, au moins un diaphragme supplémentaire est fait d'un matériau conducteur et est polarisé pour capturer ou 20 renvoyer vers le plasma des ions ou des électrons.

Selon une autre caractéristique de l'invention, le premier constituant et/ou le deuxième constituant sont introduits dans au moins une des $Q+1$ zones de la chambre.

25 Selon une autre caractéristique de l'invention, la chambre présente une forme en tronc de cône qui participe aux moyens pour établir le gradient de pression.

Selon une autre caractéristique de l'invention, la source comprend des moyens de pompage qui participent aux moyens pour établir un gradient de pression.

5 Selon une autre caractéristique de l'invention, la source comprend des moyens pour introduire des électrons supplémentaires dans la chambre.

10 Selon une autre caractéristique de l'invention, le premier constituant et/ou le deuxième constituant est un gaz ou une vapeur métallique.

15 Selon une autre caractéristique de l'invention, une structure magnétique qui participe à la source de plasma d'ions multichargés comprend deux structures magnétiques cylindriques à confinement axial du champ magnétique et une structure magnétique cylindrique à confinement radial du champ magnétique qui entoure la chambre et qui est située entre les deux structures magnétiques cylindriques à confinement axial, une première structure magnétique cylindrique à confinement axial étant située à une première extrémité de la chambre et la deuxième structure magnétique cylindrique à confinement axial étant située à une deuxième extrémité de la chambre où les photons sont extraits de la source.

20 25 Selon une autre caractéristique de l'invention, au moins une structure magnétique cylindrique à confinement axial supplémentaire est située entre les deux structures magnétiques cylindriques à confinement axial situées aux deux extrémités de la chambre.

Selon une autre caractéristique de l'invention, les structures magnétiques cylindriques à confinement axial et la structure magnétique cylindrique à confinement axial supplémentaire sont constituées de 5 bobines supraconductrices.

Selon une autre caractéristique de l'invention, la structure magnétique cylindrique à confinement radial est constituée de bobines supraconductrices.

Selon une autre caractéristique de l'invention, 10 les bobines supraconductrices qui constituent la structure magnétique cylindrique à confinement radial sont à l'intérieur des bobines supraconductrices qui constituent les structures magnétiques à confinement axial.

15 Selon une autre caractéristique de l'invention, les bobines supraconductrices qui constituent la structure magnétique cylindrique à confinement radial sont à l'extérieur des bobines supraconductrices qui constituent les structures magnétiques à confinement 20 axial.

Selon une autre caractéristique de l'invention, les bobines supraconductrices qui constituent la structure magnétique cylindrique à confinement radial sont des bobines du type en « piste de course ».

25 Selon une autre caractéristique de l'invention, la structure magnétique cylindrique à confinement radial est constituée d'aimants permanents.

Selon une autre caractéristique de l'invention, 30 la structure magnétique cylindrique à confinement axial située à la deuxième extrémité de la chambre a un

diamètre intérieur qui s'accroît pour un déplacement allant de l'intérieur de la chambre vers la sortie de la chambre.

5 Selon une autre caractéristique de l'invention, la longueur d'onde λ_0 est sensiblement égale à 13,5nm.

A titre d'exemple non limitatif, une source de photons typique selon l'invention délivre une puissance photonique de l'ordre de quelques dizaines de Watts dans 4π stéradians.

10 Brève description des figures

D'autres caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront à la lumière de la description qui va suivre faite en référence aux figures jointes, parmi lesquelles :

15 - la figure 1 représente une courbe typique de distribution de densité électronique dans un plasma RCE en fonction de la température électronique;

20 - la figure 2 représente une courbe de distribution de densité électronique dans un plasma RCE en fonction du potentiel d'ionisation de constituants de numéro atomique inférieur à 36;

- les figures 3, 5-8 et 10-14 représentent différentes variantes de sources de photons selon l'invention ;

25 - la figure 4 représente une vue de détail d'un élément de la source de photons représentée en figure 3;

- les figure 9A et 9B représentent des vues de détail d'éléments de la source de photons représentée en figure 8;

5 - les figures 15 à 17 représentent différentes structures magnétiques pouvant être utilisées dans une source de photons selon l'invention ;

10 - la figure 18 représente, dans le cadre de l'invention, une courbe de distribution de densité électronique dans un plasma RCE en fonction du potentiel d'ionisation de constituants de numéro atomique inférieur à 36.

Sur toutes les figures, les mêmes repères désignent les mêmes éléments.

15 Description détaillée de modes de mise en œuvre de l'invention

La source de photons selon l'invention comprend une source RCE.

20 La production d'ions multichargés dans une source RCE est décrite dans de nombreux brevets et articles. Par exemple, la référence [3] décrit la réalisation d'une source RCE entièrement en aimants permanents produisant un fort flux d'ions Xe^{10+} à l'extraction pour créer un faisceau d'ions.

25 De façon générale, les sources RCE sont des sources continues ou pulsées d'ions multichargés dans lesquelles sont produits plusieurs états de charge d'une espèce donnée. L'homme du métier qui conçoit une source RCE cherche à obtenir un plasma possédant une

fonction de distribution en énergie des électrons étroite de manière à produire en grande quantité un état de charge particulier par collision électrons/ions. Par exemple, c'est l'ion Pb^{27+} qui est 5 produit par la source d'ions de l'accélérateur de particules LHC du CERN (LHC pour « Large Hadron Collider »).

Dans tout plasma RCE possédant une surface de résonance fermée, la population électronique n'est 10 cependant pas monocinétique et peut être représentée par une fonction de distribution.

Un plasma RCE contient ainsi des électrons de quelques eV (dits « électrons froids »), de quelques centaines d'eV (dits « électrons tièdes ») et de 15 quelques keV (dits « électrons chauds ») voire même de plusieurs centaines de keV (dits « électrons très chauds »).

Tous ces électrons (sauf les électrons très énergétiques) contribuent de fait à la production 20 d'ions multichargés. En effet, pour arracher un électron supplémentaire à un ion multichargé, il faut produire des collisions entre cet ion et des électrons. Les sections efficaces (ou probabilités) d'ionisation par impact électronique peuvent se déterminer 25 expérimentalement ou par calcul (voir par exemple la référence [4]). En première approximation, il est possible de dire qu'un maximum d'efficacité a lieu lorsque l'énergie des électrons est égale à trois fois le potentiel d'ionisation de l'ion.

Ainsi faut-il que le maximum de la fonction de distribution en énergie des électrons soit situé autour de 700 eV pour produire un plus grand nombre d'ions Xe^{10+} , alors qu'il doit se situer autour de 10 keV pour contribuer efficacement à la production d'ions Xe^{30+} .

A titre d'exemples non limitatifs, quelques valeurs d'énergie électronique E_e nécessaires à la production de certains ions particuliers sont indiquées sur la figure 1, à savoir :

10 - $E_e = 300\text{eV}$ pour produire l'ion Al^{4+} ,
- $E_e = 700\text{eV}$ pour produire l'ion Xe^{10+} ,
- $E_e = 2,7\text{keV}$ pour produire l'ion Ca^{15+} ,
- $E_e = 10\text{keV}$ pour produire l'ion Xe^{30+}

La courbe de densité électronique n_e présente 15 un maximum qui dépend fortement des paramètres du plasma, notamment la pression des divers éléments qui composent celui-ci ainsi que la puissance des ondes hyperfréquence qui sont injectées dans la chambre.

Parmi les différentes collisions qui 20 surviennent au sein du plasma, certaines conduisent à l'excitation des ions multichargés présents dans le plasma. C'est le cas notamment des collisions électrons/ions. La section efficace ou probabilité (« cross section » en langue anglaise) de ce processus 25 peut être déterminée expérimentalement ou par des codes de calcul. Les électrons du plasma jouent ainsi un double rôle en fonction de leur énergie : ils créent les ions multichargés et ils les excitent. Les ions

excités reviennent à un état stable en émettant des photons.

Le tableau 1 ci-dessous donne quelques exemples de transitions possibles, au voisinage de 13 nm, pour 5 des éléments de nombre atomique Z inférieur à 36.

Longueur d'onde (nm)	Élément (Z)	Charge	Transition
13,0411	Al (13)	4+	$2s^2 2p^4$ (3P) $3s-2s^2 2p^5$
13,0847	Al (13)	4+	$2s^2 2p^4$ (3P) $3s-2s^2 2p^5$
13,0952	Sc (21)	12+	$2s 2p^6$ - $2s^2 2p^5$
13,1438	Al (13)	4+	$2s^2 2p^4$ (3P) $3s-2s^2 2p^5$
13,1500	Cr (24)	19+	$2s 2p^2$ - $2s^2 2p$
13,1633	K (19)	8+	$2p^6 4p$ - $2p^6 3s$
13,1638	Cr (24)	7+	$3s^2 3p^4 4s$ - $3s^2 3p^5$
13,1880	K (19)	8+	$2p^6 4p$ - $2p^6 3s$
13,2171	Mg (12)	4+	$2s^2 2p^3 3s$ - $2s^2 2p^4$
13,3162	Na (11)	4+	$2s^2 2p^2 3d$ - $2s^2 2p^3$
13,3395	Cr (24)	7+	$3s^2 3p^4 4s$ - $3s^2 3p^5$
13,4914	Cu (29)	10+	$3p^5 3f$ - $3p^6$

TABLEAU 1

Pour créer un plasma composé d'ions A^{q+} dans une source RCE, on injecte ou on crée tout d'abord une 10 vapeur du constituant A. Dans le cas d'éléments gazeux (H, He, N, O, Ar, Kr, Xe, etc.), une simple bouteille de gaz munie d'une vanne est connectée à la chambre à plasma. Pour produire des ions à partir d'éléments métalliques solides, on crée tout d'abord une vapeur. 15 Cette vapeur métallique peut être produite par différentes techniques bien connues dans les sources d'ions RCE.

L'intensité des photons émise est directement liée à la densité ionique des constituants qui, elle, dépend de la pression locale de ces derniers. Ainsi, par exemple, la pression donnant la densité optimale 5 d'ions Ar⁸⁺ est-elle différente de la pression donnant la densité optimale d'ions O⁶⁺.

Le figure 2 représente, à titre d'exemple non limitatif, une courbe de distribution de densité électronique n_e dans un plasma RCE en fonction du 10 potentiel d'ionisation Pi de constituants de numéro atomique Z inférieur à 36 aptes à délivrer des photons de longueur d'onde comprise entre 13,4nm et 13,5nm. A potentiel d'ionisation croissant, les ions du plasma qui émettent des photons à la longueur d'onde souhaitée 15 sont les ions Mn⁵⁺, Cr⁷⁺, Mg⁴⁺, Na⁴⁺, F⁴⁺, Sc⁹⁺, V⁷⁺, Na⁵⁺, F⁵⁺, Cu¹⁰⁺, F⁶⁺, Ca¹³⁺, Ti¹⁴⁺, Sc¹⁵⁺, Ti¹⁵⁺, V¹⁶⁺, Cr¹⁸⁺, Cr¹⁹⁺.

Une caractéristique essentielle de l'invention consiste à modifier la distribution de densité électronique du plasma présent dans la chambre afin de 20 créer des ions multichargés supplémentaires qui émettent par désexcitation des photons à la longueur d'onde souhaitée.

Il est alors possible d'améliorer très sensiblement le niveau de puissance de l'émission 25 photonique du plasma RCE en utilisant la large distribution en énergie des électrons du plasma. Plusieurs constituants peuvent alors être ionisés et délivrer, par désexcitation des ions ainsi formés, une puissance photonique à la longueur d'onde souhaitée. 30 Ces constituants ou espèces peuvent être n'importe quel élément du tableau périodique et, au sein de chaque

espèce, plusieurs états de charge peuvent être utilisés.

Différentes variantes de source de photons selon l'invention vont maintenant être décrites.

5 La figure 3 représente une vue en coupe d'une première variante de source de photons selon l'invention.

La source de photons comprend une chambre à plasma cylindrique sous vide CH d'axe AA entourée d'une 10 structure magnétique 1-6.

De façon connue en soi, la structure magnétique 1-6 comprend deux structures magnétiques cylindriques à confinement axial [3, 4] et [5, 6] et une structure magnétique cylindrique à confinement radial [1, 2]. Une 15 première structure cylindrique à confinement axial [3, 4] est située à une première extrémité de la chambre alors que la deuxième structure [5, 6] est située à l'autre extrémité, la structure à confinement radial étant située entre les deux structures à confinement 20 axial. Chaque structure à confinement axial donne un maximum du champ magnétique. Un guide GD d'injection de micro-ondes muni d'une fenêtre d'étanchéité (non représentée sur la figure) injecte des micro-ondes dans la chambre CH. Une surface fermée S, sans contact avec 25 les parois de la chambre et sur laquelle le champ magnétique a une valeur sensiblement égale à la valeur B_{RCE} du champ de résonance RCE est présente à l'intérieur de la chambre CH.

Un dispositif I d'injection de gaz injecte au 30 moins un gaz dans la chambre CH. Un plasma d'ions

multichargés correspondant à une distribution d'état de charge d'un premier gaz g_1 se forme à l'intérieur de la chambre CH. Par désexcitation des ions multichargés, des photons de diverses longueurs d'onde λ sont émis 5 dans la chambre et, en particulier, des photons de longueur d'onde λ_0 (par exemple, $\lambda_0 = 13,5\text{nm}$).

Deux diaphragmes D1 et D2, situés de part et d'autre de la chambre CH, créent un gradient de pression à l'intérieur de la chambre qui, appliqué au 10 gaz g_1 et/ou à un deuxième gaz g_2 différent du gaz g_1 , élargit la distribution en énergie des électrons dans la chambre CH, permettant ainsi l'obtention d'ions multichargés supplémentaires correspondant à au moins un état de charge du gaz g_1 et/ou à au moins un état de 15 charge du gaz g_2 et aptes à émettre, par désexcitation, des photons de longueur d'onde sensiblement égale à λ_0 .

Il est ainsi possible d'accroître très sensiblement la quantité de photons émise à la longueur d'onde λ_0 , selon l'axe AA, par une ouverture O 20 pratiquée dans le diaphragme D2. La forme du diaphragme D2 est préférentiellement choisie pour ne pas perturber l'émission des photons, comme cela est décrit ci-dessous en référence à la figure 4. De façon avantageuse, le diaphragme D2 peut être fait en un 25 matériau conducteur qui est polarisé pour arrêter les ions avant que ces derniers ne sortent de la source.

Les gaz g_1 et g_2 peuvent être introduits dans la chambre à plasma par le même dispositif d'injection I, comme cela est représenté en figure 3. Ils peuvent 30 également être introduits par des dispositifs d'injection différents. Les différents dispositifs

d'injection peuvent alors être placés en différents endroits correspondant à des valeurs de pression différentes. La figure 3 représente, à titre d'exemple, un système d'injection de deux gaz dans une zone de 5 haute pression favorisant ainsi la production de bas états de charge.

La figure 4 représente un exemple de diaphragme D2 qui est situé du côté de l'extraction des photons, dans le cas où le champ magnétique radial est 10 hexapolaire. Le diaphragme D2 comprend une ouverture centrale O par laquelle les photons sont extraits de la source et des trous de pompage t. Les trous de pompage t sont disposés selon trois zones Z1, Z2, Z3 séparées les unes des autres par des zones E1, E2, E3 dépourvues 15 de trous et sensiblement situées à 120° les unes des autres. Les zones E1, E2 et E3 sont des zones d'impact du plasma et constituent, principalement, les zones du diaphragme qui limitent les fuites du plasma. Dans le cas plus général où le champ magnétique radial est 20 formé de 2N pôles, les trous de pompage t sont disposés en N zones Z1, Z2, ..., ZN séparées les unes des autres par N zones E1, E2, ..., EN situées à $360^\circ/N$ les unes des autres.

Le diamètre de l'ouverture centrale O dépend de 25 la taille du plasma, laquelle dépend de l'intensité des champs magnétiques présents dans la chambre et de la fréquence des micro-ondes. Le diamètre de l'ouverture centrale O dépend également de la position du dispositif qui récupère les photons (non représenté sur 30 les figures). Le diamètre des trous t est quant à lui choisi suffisamment petit pour éviter les fuites micro-

ondes. A titre d'exemple non limitatif, le diamètre des trous peut être égal à 2mm alors que la fréquence des micro-ondes varie de 2GHz à 100GHz, ce qui correspond à une variation de longueur d'onde de 14cm à 0,3cm. A 5 diamètre de trou fixé, le nombre de trous est alors choisi en fonction de la pression souhaitée dans la chambre au voisinage du diaphragme D2.

De façon générale, la taille des ouvertures pratiquées dans le diaphragme D2 (qui est situé du côté 10 de l'extraction des photons) et la taille des ouvertures pratiquées dans le diaphragme D1 (qui est situé du côté opposé au côté d'extraction des photons) sont conçues pour obtenir une pression « faible » du côté de l'extraction des photons et une pression 15 « forte » du côté opposé. Les orifices pratiqués dans le diaphragme D1 sont en conséquence préférentiellement choisis les plus petits possibles. A titre d'exemple non limitatif, une pression de 10^{-4} mbar peut être créée du côté de l'injection des constituants, favorisant la 20 création de l'ion Cr^{7+} , alors qu'une pression de 10^{-6} mbar ou 10^{-7} mbar est créée du côté de l'extraction des photons, favorisant la création de l'ion Cr^{19+} .

La figure 5 représente une deuxième variante de source de photons selon l'invention. Outre les gaz g1 25 et/ou g2, la source de photons comprend au moins un four F pour créer une vapeur métallique qui est introduite dans la chambre. Le gradient de pression qui apparaît du fait de la présence des diaphragmes D1 et D2 est alors adapté pour accroître la densité d'ions 30 métalliques multichargés qui émettent, par désexcitation, des photons à la longueur d'onde

souhaitée. Il est alors possible de créer, par exemple, des ions Al^{4+} et Cr^{19+} qui permettent des émissions respectives de photons à 13,04nm et 13,15nm (cf. tableau ci-dessus).

5 Les vapeurs métalliques peuvent également être introduites dans la chambre CH par d'autres moyens connus, par exemple par pulvérisation (« sputtering » en langue anglaise).

10 La figure 6 représente une troisième variante de source de photons selon l'invention. Une entrée de gaz g1 est placée du côté de l'injection des micro-ondes, au niveau du diaphragme D1. Dans cette région de la chambre règne une pression élevée. Une entrée de gaz g2 est placée du côté de l'extraction des photons où règne une pression plus faible. Le gaz g1 donne alors des ions d'une première espèce ayant des états de charge faibles alors que le gaz g2 donne des ions d'une deuxième espèce ayant des états de charge élevés. Les gaz g1 et g2 peuvent être identiques ou différents.

20 La figure 7 représente une quatrième variante de source de photons selon l'invention. Toutes les entrées de gaz et/ou de vapeur métallique sont placées du côté de l'extraction des photons où règne une faible pression. Des états de charge élevés de chaque espèce peuvent alors être produits.

25 La figure 8 représente une cinquième variante de source de photons selon l'invention. Pour améliorer avantageusement le gradient de pression dans la chambre, un diaphragme supplémentaire D3 est placé dans la chambre CH entre les diaphragmes D1 et D2. Le

diaphragme D3 sépare alors la chambre en deux zones Za et Zb. La zone Za est zone de pression élevée (typiquement 10^{-4} mbar) dans laquelle sont produits des états de charge moyens (par exemple Xe^{4+}) et la zone Zb 5 est une zone de basse pression (typiquement 10^{-7} mbar) dans laquelle sont produits des états de charge plus élevés (par exemple Cr^{19+}). Dans les deux zones, les états de charge produits sont susceptibles de donner des photons de longueur d'onde λ_0 en se désexcitant.

10 La forme du diaphragme D3 est adaptée pour ne pas perturber la propagation des micro-ondes dans la cavité. Le diaphragme D3 présente alors une ouverture dont la taille est supérieure à la longueur d'onde de coupure des micro-ondes injectées dans la cavité. Par 15 ailleurs, il est également souhaitable que l'ouverture du diaphragme D3 n'intercepte pas les lignes de champ magnétique afin que les électrons et les ions du plasma puissent circuler librement de la zone Za à la zone Zb, et réciproquement. La détermination des lignes de champ 20 magnétique se calcule à l'aide de codes (par exemple des codes de type « Poisson-Superfish »).

Les figures 9A et 9B représentent, à titre 25 d'exemples, deux formes de diaphragme D3 qui respectent les conditions ci-dessus selon que le champ magnétique radial est hexapolaire (figure 9A) ou quadrupolaire (figure 9B). Dans le cas où le champ magnétique radial est hexapolaire, le diaphragme D3 possède une ouverture centrale en forme d'étoile à trois branches, laquelle ouverture entoure la surface S du plasma. De façon plus 30 générale, le diaphragme D3 possède une ouverture centrale en forme d'étoile à N branches lorsque le

champ magnétique radial est un champ à $2N$ pôles. Dans le cas où le champ magnétique radial est quadrupolaire, le diaphragme D3 possède une ouverture centrale de forme ellipsoïdale qui entoure la surface S du plasma.

5 La figure 10 représente une sixième variante de source de photons selon l'invention. La chambre CH est divisée en quatre zones distinctes Z_c , Z_d , Z_e , Z_f séparées par des diaphragmes D4, D5, D6. Les diaphragmes D4, D5, D6 sont placés entre les
10 diaphragmes D1 et D2 et ont, par exemple, des ouvertures de plus en plus grandes au fur et à mesure qu'on se rapproche du diaphragme D2 situé du côté de la sortie de la source afin d'éviter de faire obstacle à la propagation des photons vers la sortie de la source.
15 A titre d'exemple non limitatif, dans la zone Z_c sont introduits un gaz g_1 et une vapeur métallique v_{m1} , dans la zone Z_d sont introduits un gaz g_2 et une vapeur métallique v_{m2} , dans la zone Z_e sont introduits un gaz g_3 et une vapeur métallique v_{m3} et dans la zone Z_f sont
20 introduits un gaz g_4 et une vapeur métallique v_{m4} . De façon plus générale, une chambre à plasma de la source de photons selon l'invention peut être divisée en $Q+1$ zones, Q étant un nombre entier supérieur ou égal à 1, séparées les unes des autres par Q diaphragmes placés
25 entre les diaphragmes D1 et D2 situés aux deux extrémités de la chambre. Dans le cas d'une chambre cylindrique, les ouvertures pratiquées dans les Q diaphragmes sont préférentiellement alignées selon l'axe de la chambre cylindrique et entourent la surface
30 S du plasma.

La figure 11 représente une autre variante de source de photons selon l'invention. La chambre CH est en forme de tronc de cône. La sortie de la source de photons se situe sur le grand côté du tronc de cône 5 alors que l'arrivée des gaz et/ou des vapeurs métalliques se situe, par exemple, sur le petit côté. Un diaphragme en forme de grillage Gr muni d'une ouverture centrale empêche les micro-ondes de sortir de la chambre CH. La forme en tronc de cône de la chambre 10 est ici le moyen essentiel par lequel le gradient de pression est réalisé. D'autres modes de réalisation de l'invention (non représentés sur les figures) sont bien sûr possible, qui combinent la présence de tout ou partie des diaphragmes mentionnés ci-dessus avec la 15 chambre en forme de tronc de cône.

La figure 12 représente encore une autre variante de la source de photons selon l'invention.

Selon cette autre variante, la source de photons comprend un apport externe d'électrons. Cet 20 apport externe d'électrons peut être avantageusement choisi, par exemple en terme de quantité d'électrons et/ou d'énergie électronique, en fonction du ou des états de charge que l'on souhaite obtenir pour les constituants présents dans la chambre CH. Un canon à 25 électrons K, préférentiellement aligné selon l'axe AA de la chambre CH, émet alors des électrons dans la chambre CH. La densité électronique se trouve ainsi accrue pour l'obtention d'ions multichargés aptes à produire, par désexcitation, des photons à la longueur 30 d'onde souhaitée. Des diaphragmes intermédiaires D3, D4, D5 sont présents entre les diaphragmes D1 et D2.

La figure 13 représente encore une autre variante de la source de photons selon l'invention.

La structure magnétique cylindrique [5, 6] située du côté de l'extraction des photons a ici une forme en tronc de cône sur son diamètre intérieur, le tronc de cône s'élargissant quand on se déplace de l'intérieur de la chambre vers la sortie de la source. La zone d'émission de photons s'en trouve avantageusement accrue.

La figure 14 représente encore une autre variante de la source de photons selon l'invention.

La source de photons de la figure 14 contient un plasma fin fortement confiné dont la longueur, selon l'axe AA de la chambre, est accrue par rapport à la longueur des plasmas des sources de photons précédentes. A titre d'exemple non limitatif, la longueur du plasma fortement confiné peut alors être égale à 23cm alors que la longueur d'un plasma non confiné (cf. figures 3, 5, 6, 8, 10, 12, 13) est égale, par exemple, à 6cm. De façon connue en soi, un tel accroissement de la longueur du plasma s'obtient en éloignant les deux structures magnétiques cylindriques à confinement axial [3,4] et [5,6]. La longueur de la chambre CH est alors également accrue, de même que la longueur de la structure magnétique cylindrique à confinement radial [7,8] qui entoure celle-ci. De façon connue en soi, il est alors nécessaire de placer au moins une structure à confinement axial supplémentaire entre les structures magnétiques [3, 4] et [5, 6] afin d'optimiser la valeur du minimum de champ magnétique. A titre d'exemple non limitatif, la source de photons

représentée en figure 10 comprend deux structures à confinement axial supplémentaires [9, 10] et [11, 12]. A titre d'exemple non limitatif, des diaphragmes intermédiaires D3-D7 sont présents entre les 5 diaphragmes D1 et D2. Avantageusement, au plus la longueur du plasma est grande, au plus le nombre de diaphragmes intermédiaires entre les diaphragmes D1 et D2 est élevé, permettant ainsi un meilleur contrôle du gradient de pression à l'intérieur de la chambre.

10 Un plasma fortement confiné produit une fine émission de photons qui permet non seulement d'augmenter la puissance émise mais également d'éviter les éventuels débris pouvant être produits par impacts des particules du plasma sur la chambre (phénomène 15 connu sous le terme de langue anglaise « sputtering »).

D'autres moyens connus peuvent également être mis en œuvre pour augmenter la puissance émise comme, par exemple, l'augmentation de la puissance et/ou de la fréquence des micro-ondes injectées dans la chambre CH 20 par le guide d'injection GD. Un émetteur à 37GHz délivrant une puissance micro-onde continue de 15kW peut ainsi être utilisé.

Selon une variante de l'invention, la structure magnétique qui crée le champ magnétique axial est 25 constituée, par exemple, de quatre bobinages axiaux supraconducteurs B1, B2, B3, B4 comme cela est représenté en figure 15. Les bobinages B1 et B2 créent les maxima du champ magnétique aux deux extrémités de la chambre alors que les bobinages B3 et B4, situés 30 entre les bobinages B1 et B2, optimisent les minima de ce champ. Les bobinages B1, B2, B3 et B4 sont réalisés,

par exemple, avec des matériaux supraconducteurs dans une gamme de températures variant de 1,5°K à 100°K. Le champ magnétique radial est ici créé par un hexapole H constitué, par exemple, de 24 secteurs d'aimants permanents. Selon un mode de réalisation particulier (non représenté sur les figures), le bobinage B4 situé du côté de l'extraction des photons présente une forme en tronc de cône sur son diamètre intérieur, le diamètre s'élargissant quand on se déplace de l'intérieur de la chambre vers la sortie de la source. De même que dans le cas illustré en figure 13, la zone d'émission des photons s'en trouve avantageusement accrue.

En référence aux figures précédentes, les aimants permanents [7, 8], H utilisés pour confiner radialement le plasma ont une rémanence et un champ coercitif limités. Les maxima du champ magnétique ne peuvent alors pas dépasser 1,5T. Pour construire des sources de photons plus puissantes opérant avec des micro-ondes de fréquences élevées, par exemple des fréquences comprises dans la bande 18GHz-24GHz (voire supérieures à cette bande), des bobines supraconductrices peuvent être utilisées pour créer le champ magnétique radial.

La figure 16 représente une variante de structure magnétique selon l'invention dans laquelle des bobines supraconductrices R1-R6 sont utilisées pour créer le champ magnétique radial. La structure magnétique de la source RCE est alors entièrement réalisée à l'aide de bobinages supraconducteurs. A titre d'exemple non limitatif, trois bobinages

supraconducteurs B5, B6, B7 créent le confinement axial du champ magnétique alors que six bobinages supraconducteurs R1-R6 créent le confinement radial. Les six bobinages supraconducteurs R1-R6 sont, par 5 exemple, de type hexapolaire (trois pôles Nord/trois pôles Sud, un pôle Nord alternant avec un pôle Sud) de type communément appelé en « piste de course » (« racetrack » en langue anglaise). Selon un premier mode de réalisation particulier, les bobines 10 supraconductrices qui créent le champ magnétique radial et/ou axial sont constituées de matériau supraconducteur dont la température critique est suffisamment basse pour pouvoir être utilisées, par exemple, à température inférieure à 5°K. Selon un autre 15 mode de réalisation particulier, le matériau supraconducteur est dit à « haute température critique » (matériau HTS en langue anglaise) pour pouvoir être utilisé, par exemple, à une température de l'ordre de 70°K.

20 Selon une autre variante de l'invention, les bobinages à confinement radial peuvent également être placés à l'extérieur de la structure à confinement axial, comme cela est représenté en figure 17. Cette variante est avantageuse, dans certains cas, pour des 25 raisons d'encombrement. Le champ magnétique radial est par exemple dodécapolaire, réalisé par douze bobinages R1-R12 de type en « piste de course » (six pôles Nord alternant avec six pôles Sud).

La figure 18 représente, dans le cadre de 30 l'invention, un exemple de courbe de distribution de densité électronique n_e dans un plasma RCE en fonction

du potentiel d'ionisation Π de constituants de numéro atomique inférieur à 36. Cette courbe est à comparer avec la courbe de la figure 2 qui correspond au cas où la source de photons est dépourvue de moyens 5 spécifiques pour établir un gradient de pression dans la chambre.

Le gradient de pression applique ici une « forte » pression pour les constituants qui requièrent un potentiel d'ionisation relativement bas (quelques 10 dizaines d'eV) et une « faible » pression pour les constituants qui requièrent un potentiel d'ionisation plus élevé (quelques centaines d'eV). Le gradient de pression accroît ainsi avantageusement la densité électronique du plasma et, partant, la densité des ions 15 aptes à émettre des photons par désexcitation.

RÉFÉRENCES

[1] Demande de brevet américain N°20030006708 intitulée
« Microwave ion source », K.N. Leung, J. Reijonen,
5 R. Thomae, déposée le 9 janvier 2003.

[2] « All-permanent magnet ECR plasma for EUV light »,
D. Hitz, M. Delaunay, E. Quesnel, C. Vannuffel, P.
Michallon, A. Girard, L. Guillemet, 3ème symposium
10 EUVL (Novembre 2004), Miyazaki, Japon.

[3] « An all-permanent magnet ECR ion source for the
ORNL MIRF upgrade project », D. Hitz et al., 16
International Workshop on ECR Ion Source ECRIS'04,
15 20-30 septembre 2004, Berkeley USA.

[4] "Atomic Data and Nuclear Data Tables", volume 36,
p.167-353 (1987), H. Tawara, T. Kato.

REVENDICATIONS

1. Source de photons comprenant une source de plasma d'ions multichargés à la résonance cyclotron 5 électronique (RCE), les ions multichargés correspondant à plusieurs états de charge d'un premier constituant (g1) introduit dans une chambre (CH) sous vide, au moins un état de charge émettant, par désexcitation, des photons de longueur d'onde λ_0 , caractérisée en ce 10 qu'elle comprend, en outre, des moyens pour établir, à l'intérieur de la chambre (CH), un gradient de pression du premier constituant (g1) et/ou d'au moins un deuxième constituant (g2) différent du premier constituant (g1), le gradient de pression étant apte à 15 créer un gradient en énergie d'électrons du plasma tel que des ions multichargés supplémentaires correspondant à au moins un état de charge du premier constituant (g1) et/ou au moins un état de charge du deuxième constituant (g2) sont créés dans la chambre, les ions 20 multichargés supplémentaires émettant, par désexcitation, des photons de longueur d'onde sensiblement égale à λ_0 .

2. Source de photons selon la revendication 1, 25 caractérisée en ce que les moyens pour établir un gradient de pression comprennent un premier diaphragme (D1) situé sur un premier côté de la chambre et un deuxième diaphragme (D2) situé sur un deuxième côté de la chambre, opposé au premier côté, où est située une 30 ouverture par laquelle les photons sont extraits de la source de photons.

3. Source de photons selon la revendication 2, caractérisée en ce que le deuxième diaphragme (D2) comprend un orifice central (O) par lequel les photons sont extraits de la source de photons et des trous de pompage (t) distribués autour de l'orifice central, le diamètre des trous de pompage (t) étant choisi pour empêcher que des micro-ondes qui sont injectées dans la chambre (CH) cylindrique sous vide ne sortent de la chambre, le nombre de trous de pompage étant choisi, en relation avec le diamètre des trous, pour établir une valeur de pression du premier constituant (g1) et/ou du deuxième constituant (g2) dans une zone de la chambre située à proximité du deuxième diaphragme.

15 4. Source de photons selon la revendication 3, caractérisée en ce que le deuxième diaphragme (D2) est fait d'un matériau conducteur et en ce qu'il est polarisé soit pour capturer des ions sur des zones d'impact (E1, E2, E3) et pour renvoyer des électrons 20 vers le plasma, soit pour capturer des électrons sur des zones d'impact (E1, E2, E3) et pour renvoyer des ions vers le plasma.

25 5. Source de photons selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisée en ce qu'elle comprend Q diaphragmes supplémentaires (D3, D4, D5, D6) placés entre les premier et deuxième diaphragmes de sorte que la chambre est divisée en Q+1 zones.

6. Source de photon selon la revendication 5, caractérisée en ce que chacun des Q diaphragmes supplémentaires (D3, D4, D5, D6) comprend une ouverture de taille supérieure à une longueur d'onde de coupure 5 de micro-ondes injectées dans la chambre.

7. Source de photons selon la revendication 6, caractérisée en ce que l'ouverture de chacun des Q diaphragmes supplémentaires a une forme telle qu'elle 10 n'intercepte pas les lignes d'un champ magnétique présent dans la chambre, laissant ainsi des particules du plasma circuler librement entre les Q+1 zones.

8. Source de photons selon l'une quelconque des 15 revendications 5 à 7, caractérisée en ce qu'au moins un diaphragme supplémentaire (D3, D4, D5, D6) est fait d'un matériau conducteur et ce qu'il est polarisé pour capturer ou renvoyer vers le plasma des ions ou des électrons.

20

9. Source de photons selon l'une quelconque des revendications 5 à 8, caractérisée en ce que le premier constituant (g1) et/ou le deuxième constituant (g2) 25 sont introduits dans au moins une des Q+1 zones de la chambre.

10. Source de photons selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisée en ce que la chambre présente une forme en tronc de cône qui

participe aux moyens pour établir le gradient de pression.

11. Source de photons selon l'une quelconque
5 des revendications précédentes, caractérisée en ce qu'elle comprend des moyens de pompage (P) qui participent aux moyens pour établir un gradient de pression.

10 12. Source de photons selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisée en ce qu'elle comprend des moyens (K) pour introduire des électrons supplémentaires dans la chambre (CH).

15 13. Source de photons selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisée en ce que le premier constituant (g1) et/ou le deuxième constituant (g2) est un gaz ou une vapeur métallique.

20 14. Source de photons selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisée en ce qu'une structure magnétique qui participe à la source de plasma d'ions multichargés comprend deux structures magnétiques cylindriques ([3,4], [5,6]) à confinement axial du champ magnétique et une structure magnétique cylindrique ([7,8]) à confinement radial du champ magnétique qui entoure la chambre (CH) et qui est située entre les deux structures magnétiques cylindriques à confinement axial, une première

structure magnétique cylindrique à confinement axial étant située à une première extrémité de la chambre et la deuxième structure magnétique cylindrique à confinement axial étant située à une deuxième extrémité 5 de la chambre où les photons sont extraits de la source.

15. Source de photons selon la revendication 14, caractérisée en ce qu'au moins une structure 10 magnétique cylindrique à confinement axial supplémentaire ([9,10], [11,12]) est située entre les deux structures magnétiques cylindriques à confinement axial situées aux deux extrémités de la chambre (CH).

15 16. Source de photons selon la revendication 15, caractérisée en ce que les structures magnétiques cylindriques à confinement axial et la structure magnétique cylindrique à confinement axial 20 supplémentaire sont constituées de bobines supraconductrices.

17. Source de photons selon la revendication 16, caractérisée en ce que la structure magnétique cylindrique à confinement radial est constituée de 25 bobines supraconductrices.

18. Source de photons selon la revendication 17, caractérisée en ce que les bobines supraconductrices qui constituent la structure

magnétique cylindrique à confinement radial sont à l'intérieur des bobines supraconductrices qui constituent les structures magnétiques à confinement axial.

5

19. Source de photons selon la revendication 17, caractérisée en ce que les bobines supraconductrices qui constituent la structure magnétique cylindrique à confinement radial sont à l'extérieur des bobines supraconductrices qui constituent les structures magnétiques à confinement axial.

20. Source de photons selon l'une quelconque des revendications 17, 18 ou 19, caractérisée en ce que les bobines supraconductrices qui constituent la structure magnétique cylindrique à confinement radial sont des bobines du type en « piste de course ».

21. Source de photons selon l'une quelconque des revendications 14 à 16, caractérisée en ce que la structure magnétique cylindrique à confinement radial est constituée d'aimants permanents.

22. Source de photons selon l'une quelconque des revendications 14 à 21, caractérisée en ce que la structure magnétique cylindrique à confinement axial située à la deuxième extrémité de la chambre a un diamètre intérieur qui s'accroît pour un déplacement

allant de l'intérieur de la chambre vers la sortie de la chambre.

23. Source de photons selon l'une quelconque
5 des revendications précédentes, caractérisée en ce que la longueur d'onde λ_0 est sensiblement égale à 13,5nm.

ABRÉGÉ DESCRIPTIF

L'invention concerne une source de photons comprenant une source de plasma d'ions multichargés à la résonance cyclotron électronique (RCE), les ions multichargés correspondant à plusieurs états de charge d'un premier constituant (g1) introduit dans une chambre (CH) sous vide, au moins un état de charge émettant, par désexcitation, des photons de longueur d'onde λ_0 , caractérisée en ce qu'elle comprend, en outre, des moyens pour établir, à l'intérieur de la chambre (CH), un gradient de pression du premier constituant (g1) et/ou d'au moins un deuxième constituant (g2) différent du premier constituant (g1), le gradient de pression étant apte à créer un gradient en énergie d'électrons du plasma tel que des ions multichargés supplémentaires soient créés qui émettent, par désexcitation, des photons de longueur d'onde sensiblement égale à λ_0 .

L'invention s'applique à la production de photons « Extrême Ultra Violet » utilisés pour la lithographie.

FIGURE 3.

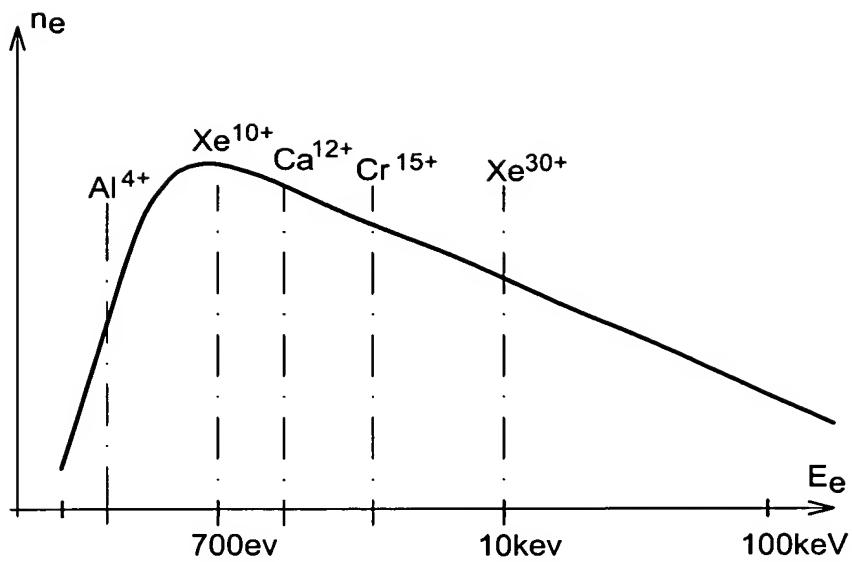


FIG. 1

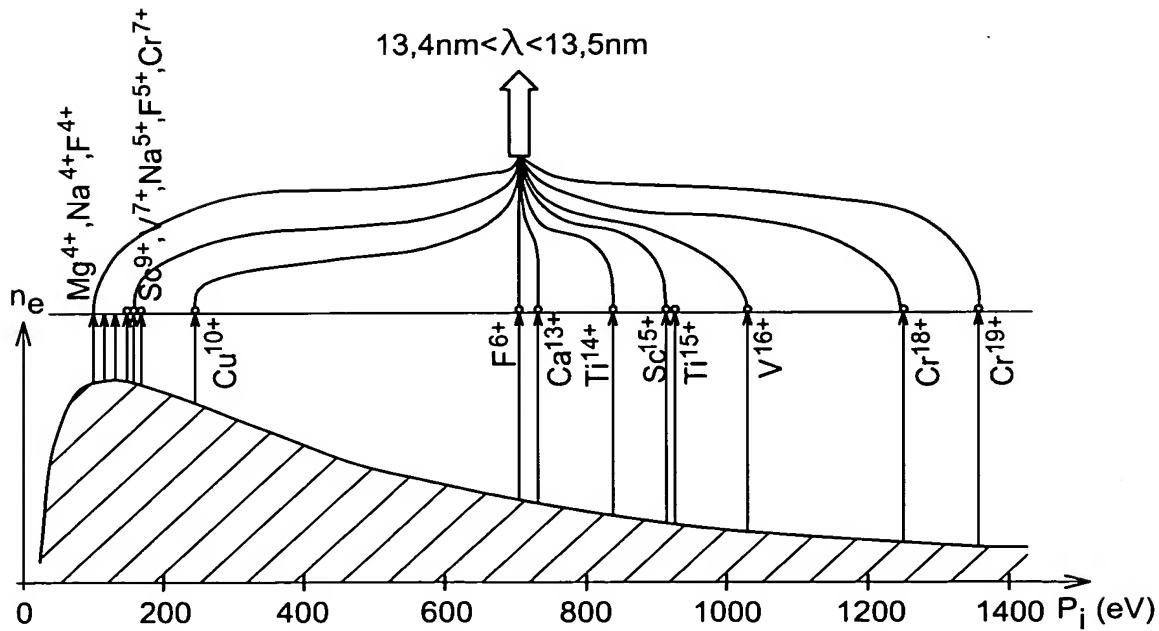


FIG. 2

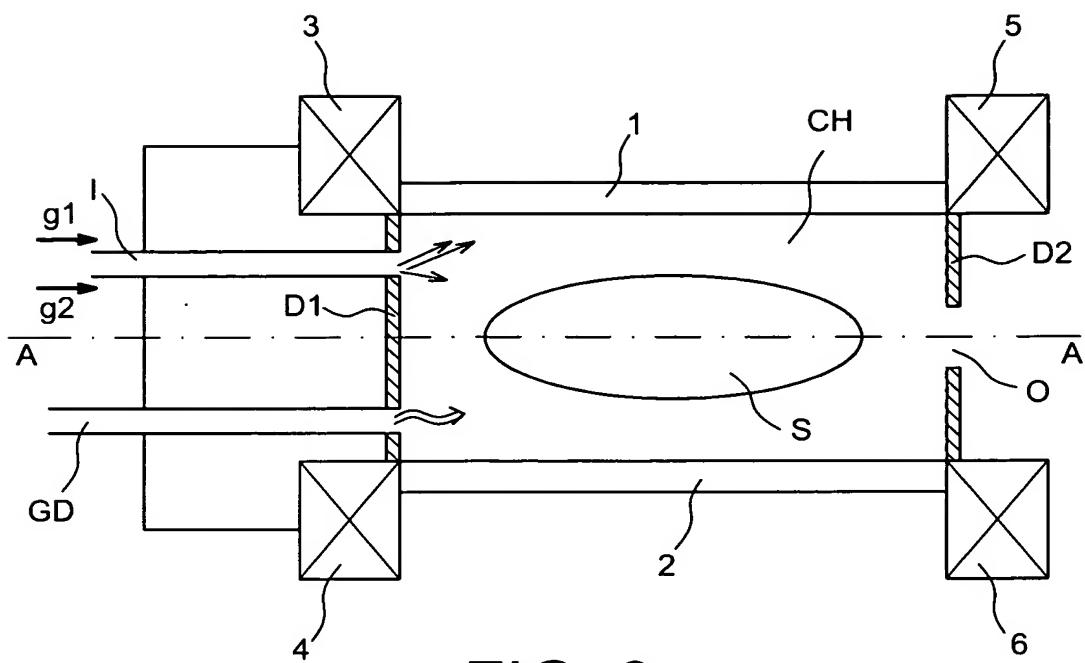


FIG. 3

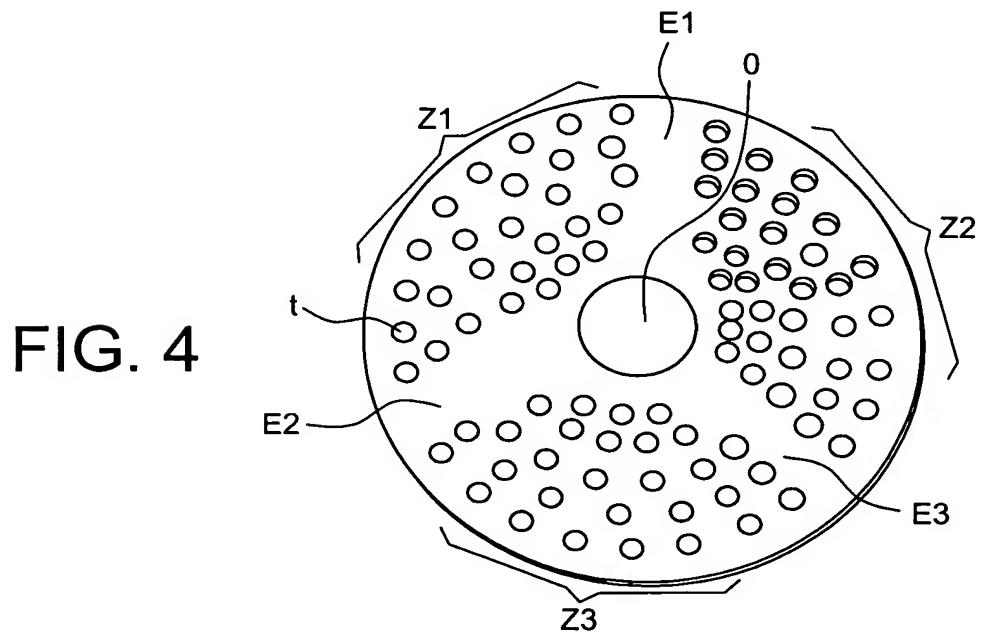
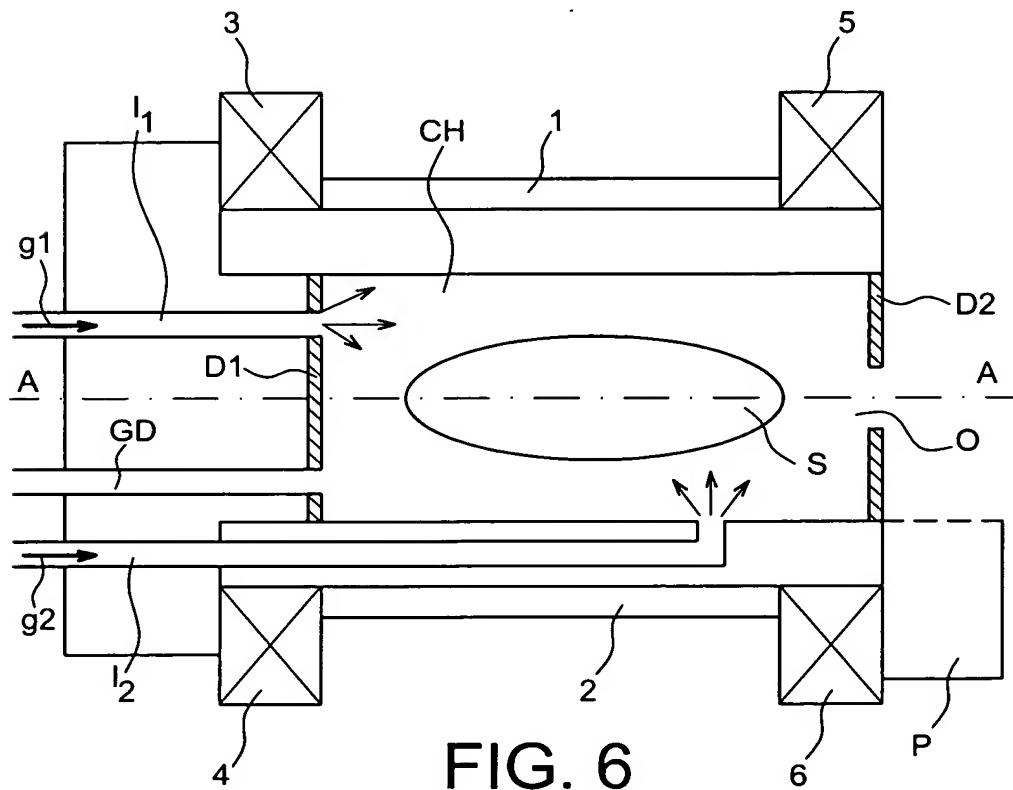
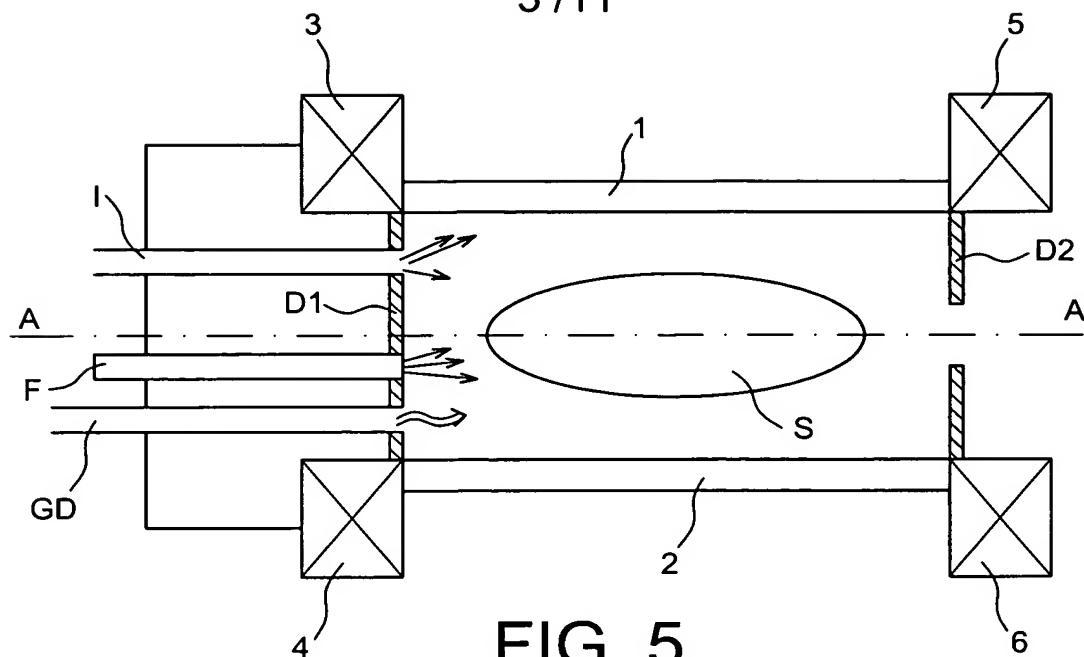


FIG. 4



4 /11

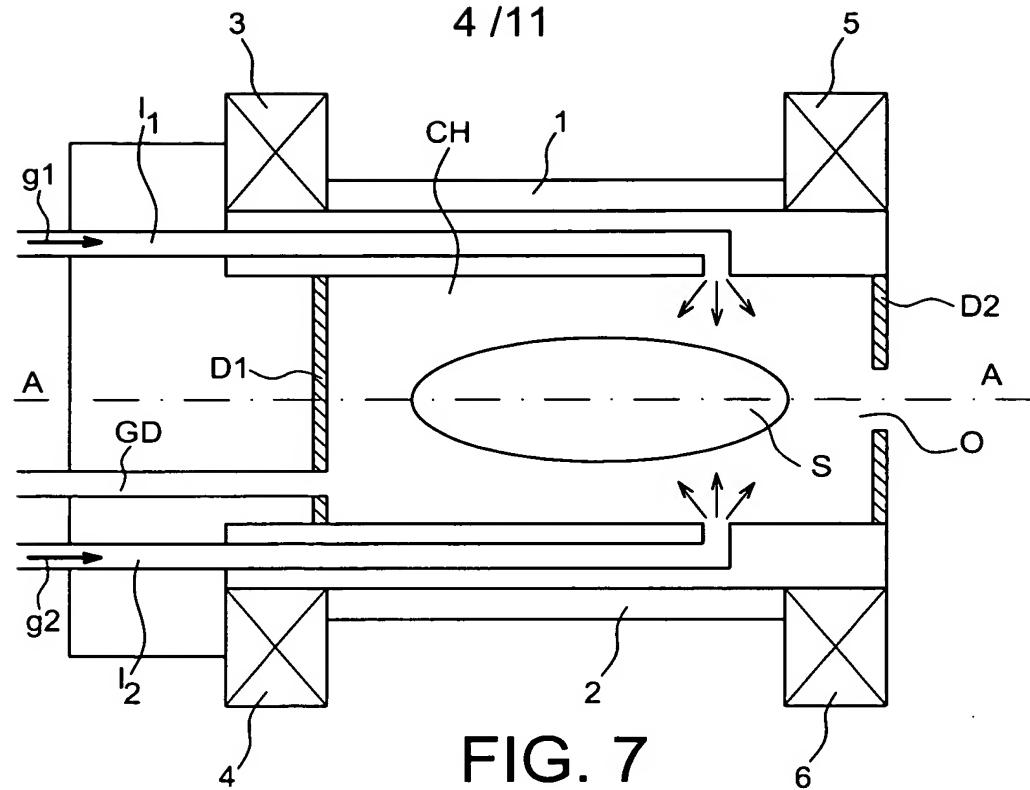


FIG. 7

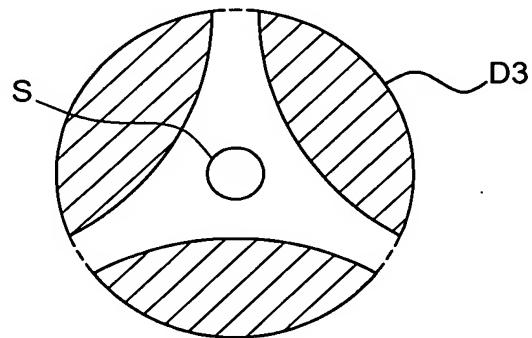


FIG. 9A

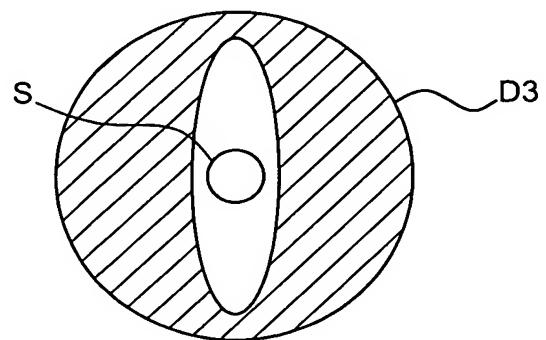
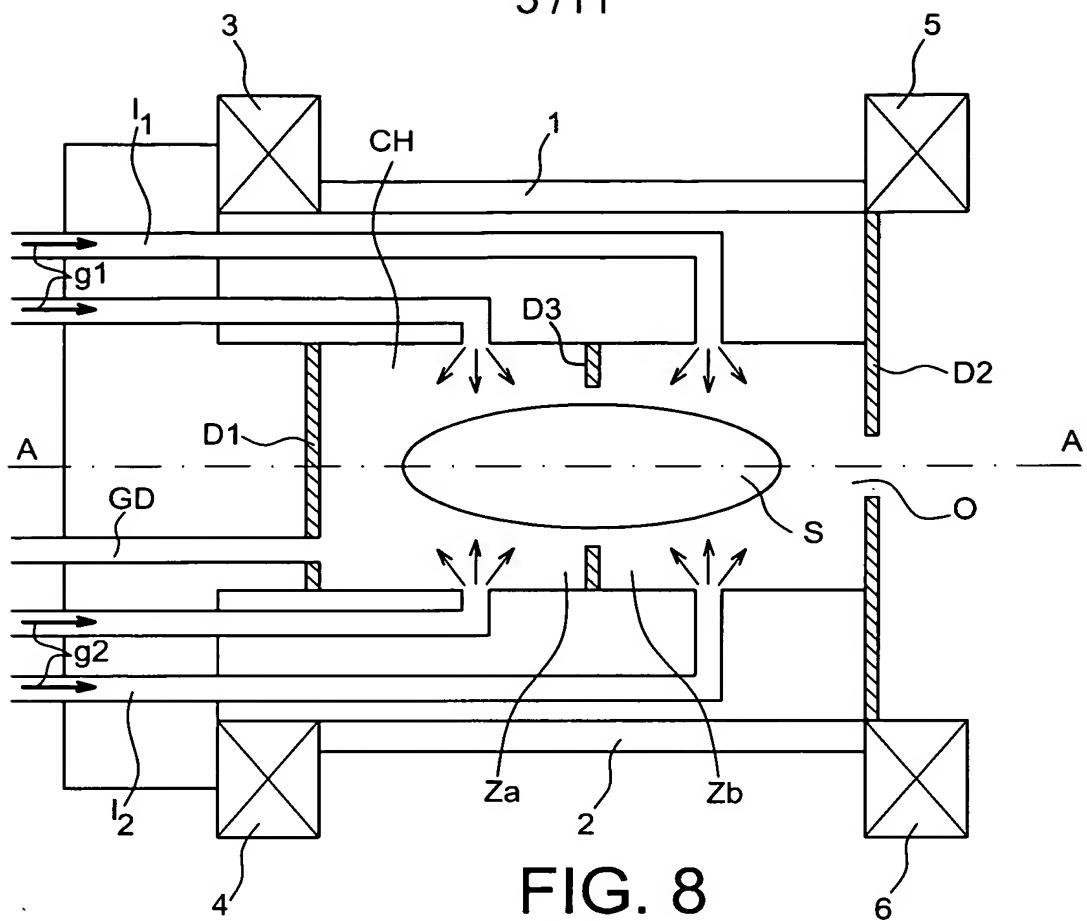
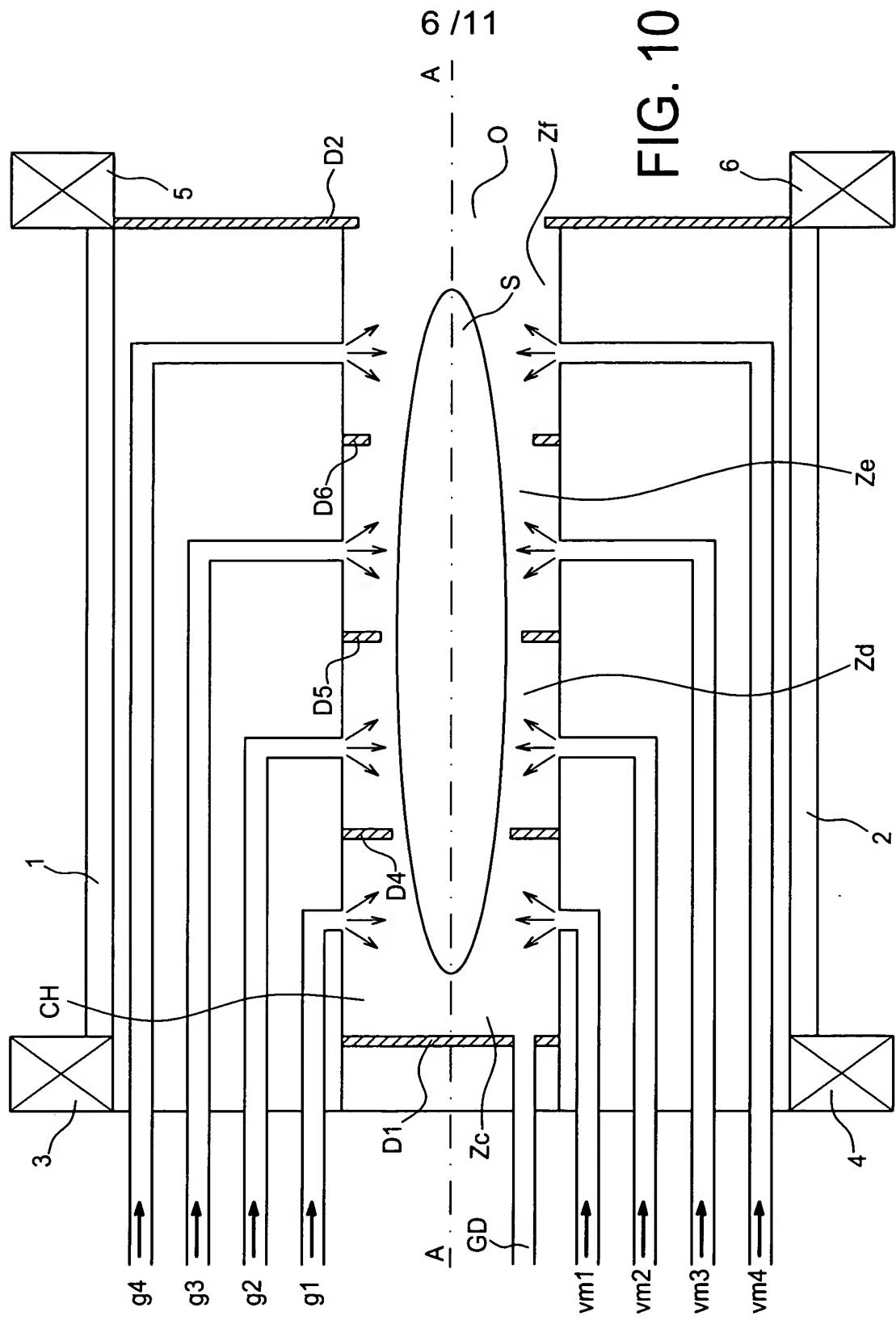


FIG. 10



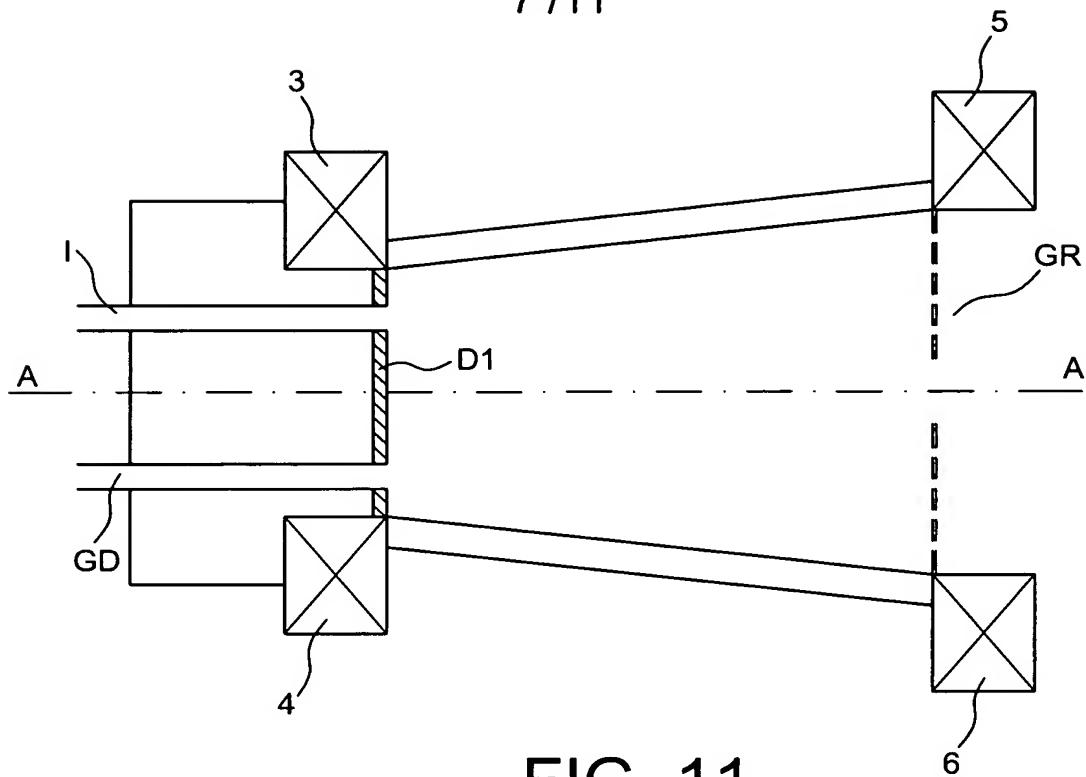


FIG. 11

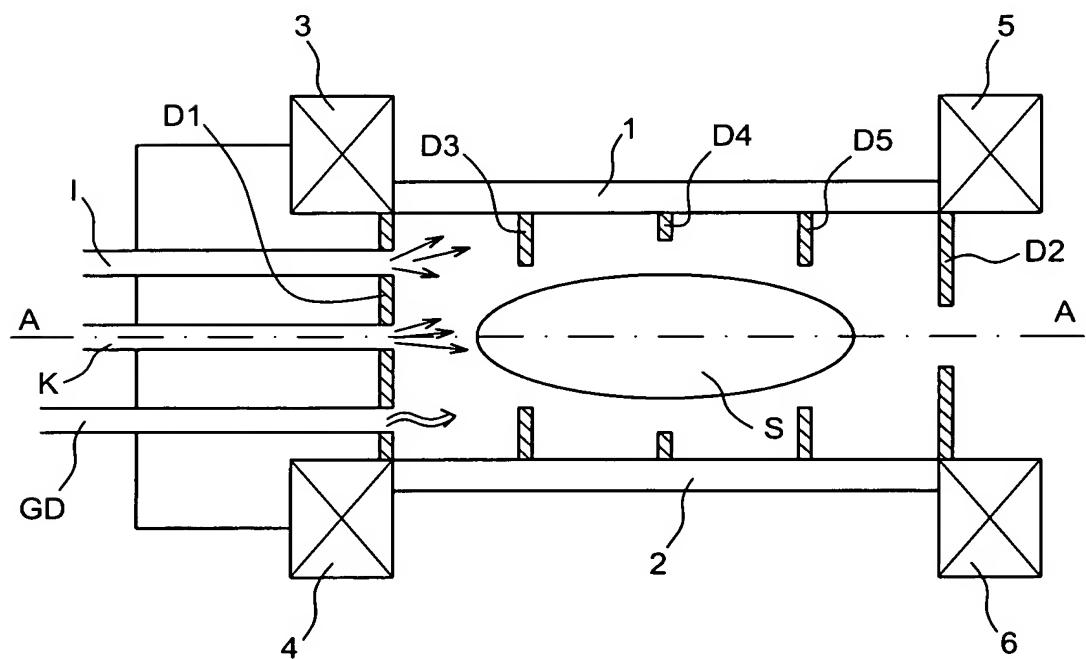


FIG. 12

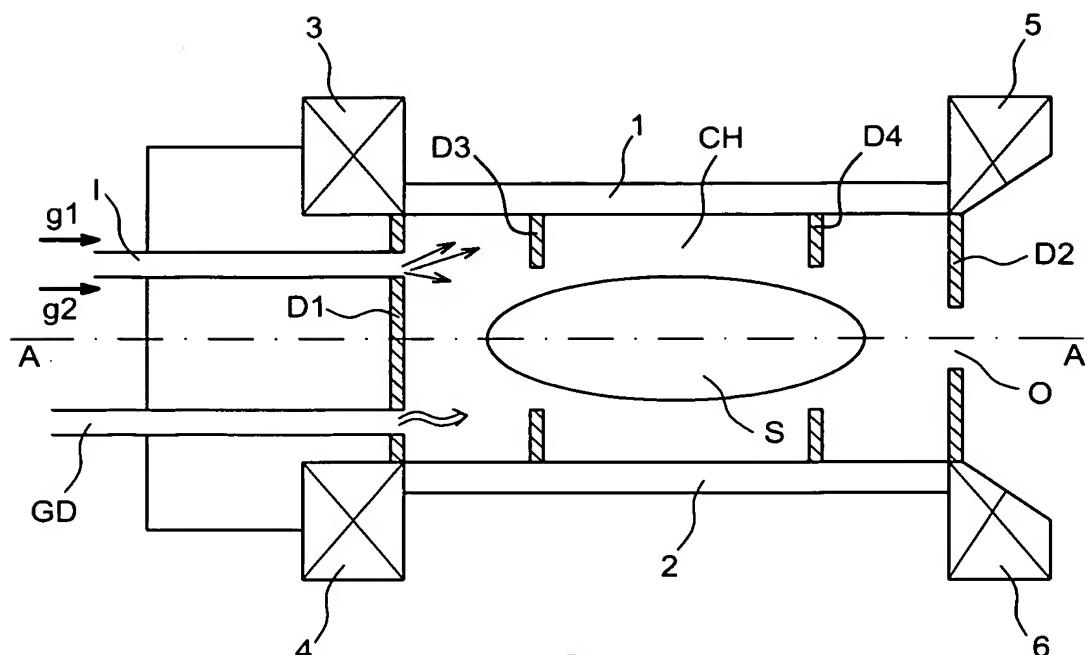


FIG. 13

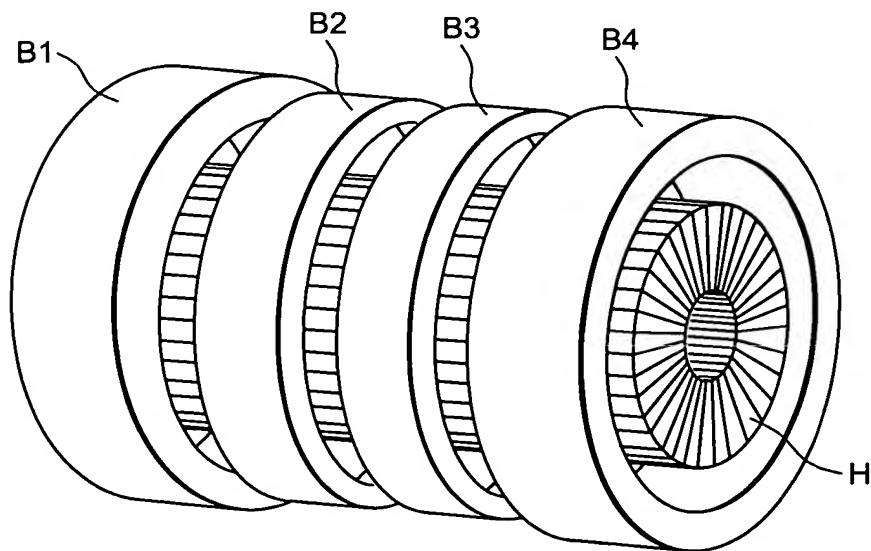


FIG. 15

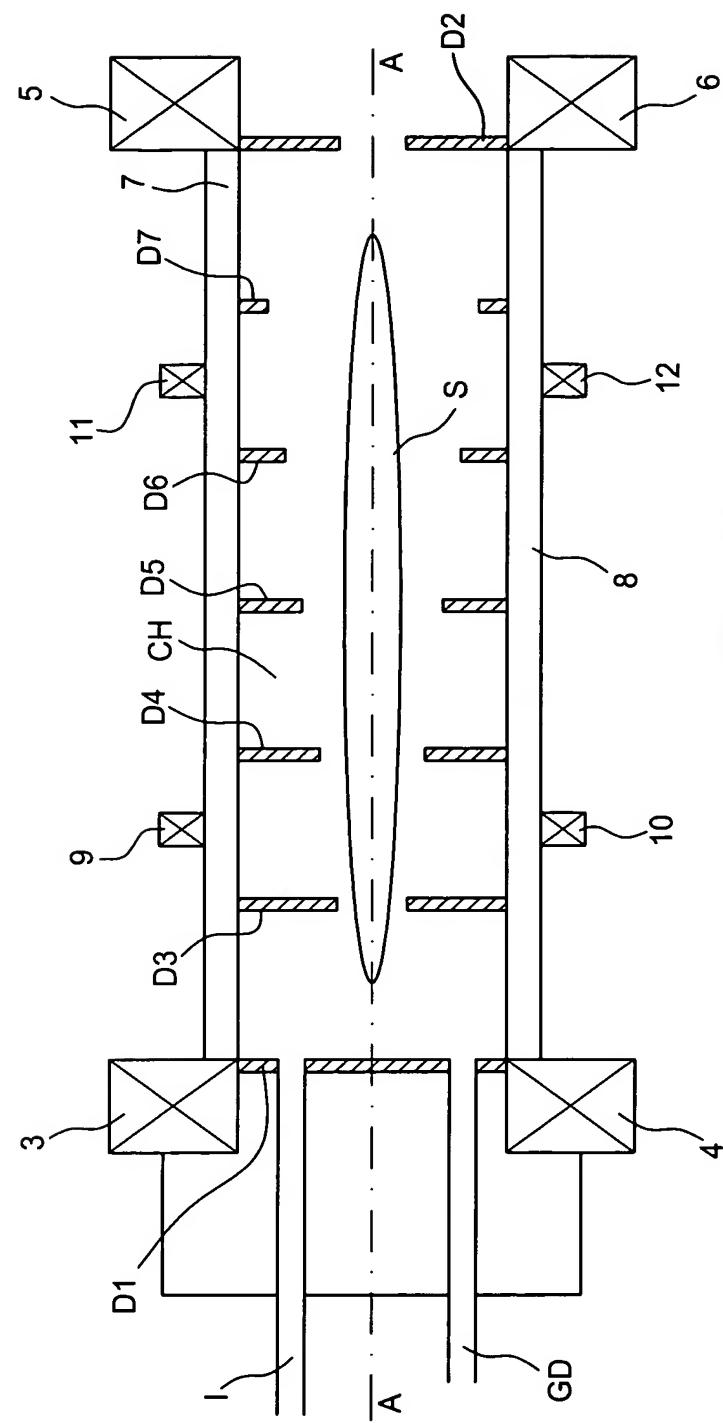


FIG. 14

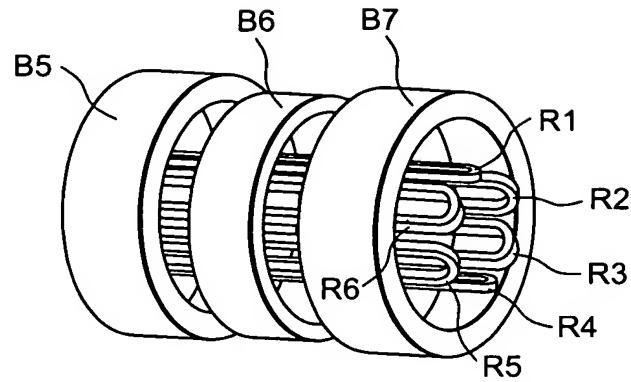


FIG. 16

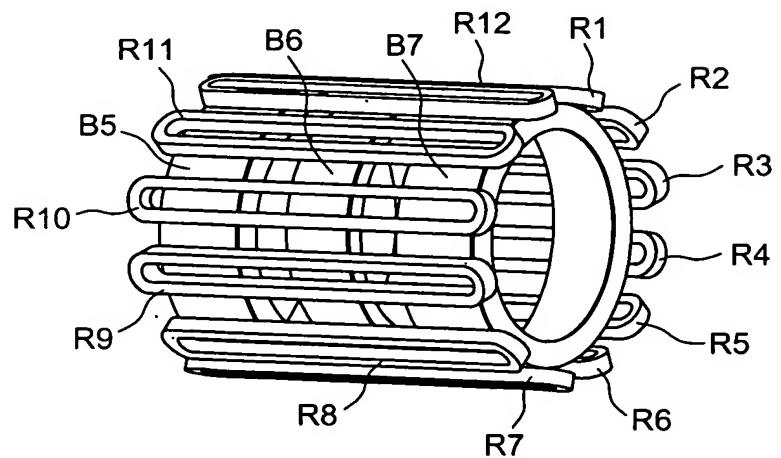


FIG. 17

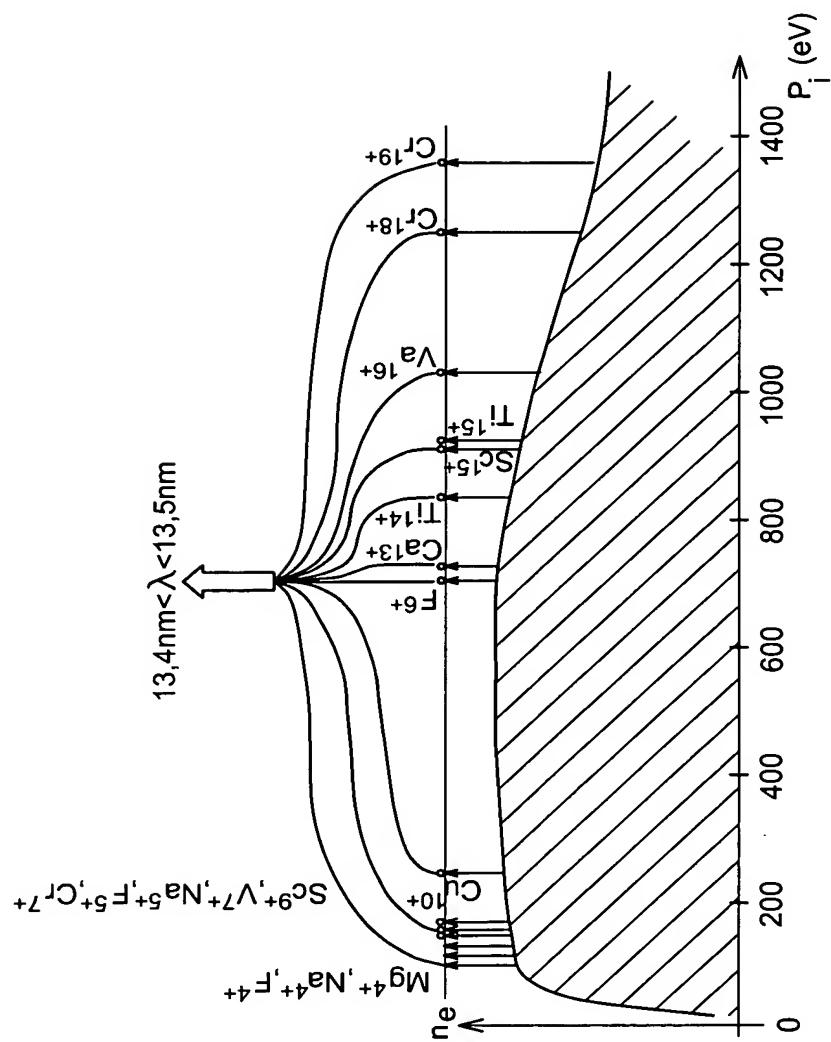


FIG. 18